БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 631.22.018 10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135

Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства*

Б. Ч. Месхи[1], Н. В. Лимаренко[2], В. П. Жаров[3], Б. Г. Шаповал[4]
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Creation of mathematical model for estimating energy intensity of livestock wastes disinfection***

B. C. Meskhi[1], N. V. Limarenko[2], V. P. Zharov[3], B. G. Shapoval[4]
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Рассмотрен перспективный способ обеззараживания стоков животноводства. Суть способа заключается в комплексном физико-химическом воздействии переменного магнитного поля в сочетании с химическим реагентом. Устройством реализации предложенного способа является индуктор. В качестве параметра, характеризующего энергетическую эффективность технологического процесса обеззараживания стоков животноводства, выбрана удельная электрическая энергоёмкость. Для повышения эффективности исследования технологического процесса обеззараживания стоков животноводства предлагается использовать математическую теорию планирования эксперимента.
Материалы и методы. В ходе проведения данного исследования использовались методы: инструментального, прямого и косвенного измерения, статистической обработки данных, математическая теория планирования эксперимента.
Результаты исследования. Экспериментально исследовано влияние технологических факторов на энергетическую эффективность технологического процесса обеззараживания стоков животноводства. На основании полученных данных выполнено ранжирование по силе влияния технологических факторов на удельную электрическую энергоёмкость процесса. Установлена несущественная степень влияния оценок коэффициентов парного взаимодействия, на что указывает их отсутствие в математической модели.
Обсуждение и заключения. Создана математическая модель технологического процесса обеззараживания стоков животноводства, позволяющая оценить влияния технологических факторов на удельную электрическую энергоёмкость процесса обеззараживания.

Introduction. A perspective method of the livestock wastes disinfection is considered. The key point of the method is in complex physical and chemical impact of the variable magnetic field coupled with a chemical reagent. The device for implementing the proposed technique is an inductor. Electric energy intensity is selected as a parameter characterizing the energy efficiency of the of livestock wastes disinfection process. To increase the efficiency of investigating the livestock wastes disinfection process, it is proposed to use the mathematical experimental design theory.
Materials and Methods. In the course of this research, the following techniques were used: instrument, direct and indirect methods of measurement, statistical processing technique, and mathematical experimental design theory.
Research Results. The effect of technological factors on the energy efficiency of the livestock wastes disinfection process is experimentally investigated. On the basis of the data obtained, the strength effect ranking of the technology factors on the specific electrical energy capacity of the process is performed. A noncritical degree of impact of evaluating the pair-wise interaction coefficients is established. Their absence in the mathematical model suggests this.
Discussion and Conclusions. A mathematical model of the livestock wastes disinfection process which allows evaluating the effect of the technology factors on the specific electrical energy intensity of the given process is developed.

Ключевые слова: обеззараживание, стоки животноводства, индуктор, математическая теория планирования эксперимента, математическая модель.

Keywords: disinfection, livestock wastes, inductor, mathematical experimental design theory; mathematic model.

***Образец для цитирования*:** Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства. Б. Ч. Месхи [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 129–135.

For citation: B.C. Meskhi, N.V. Limarenko, V.P. Zharov, B.G. Shapoval. Creation of mathematical model for estimating energy intensity of livestock wastes disinfection. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.4, pp. 129–135

Введение. Одним из основных факторов загрязнения окружающей среды являются промышленные стоки сельского хозяйства. Наибольшую опасность представляют сточные воды животноводства (далее стоки), являющиеся

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФСИ (fasie.ru), грант № 0032776.
**E-mail: reception@donstu.ru ,limarenkodstu@yandex.ru, zharovvp@mail.ru, nba-shapoval@yandex.ru
*** The work was fulfilled with financial support of FSI (fasie.ru), grant № 0032776.

источником большого количества заболеваний, утилизация которых невозможна без их обеззараживания. Наиболее перспективным способом обеззараживания стоков является комплексное физико-химическое воздействие вращающегося переменного магнитного поля и активного хлора [1]. Энергетическим параметром качества процесса обеззараживания является удельная энергоёмкость процесса. Соответственно, создание математической модели, позволяющей оценить влияние технологических факторов на энергоёмкость процесса, является актуальной задачей.

Решить эту проблему можно используя математическую теорию планирования эксперимента.

Целью данного исследования являлось создание математической модели технологического процесса обеззараживания, оценивающей его энергетическую эффективность.

Экспериментальное исследование. Для оценки энергетической эффективности процесса необходимо рассматривать затраты электрической энергии на получение единицы готовой продукции, то есть удельной электрической энергии. В качестве единицы готовой продукции лучше всего рассматривать её объём.

На основании вышеизложенного, при оценке энергии, затраченной на технологический процесс, необходимо рассматривать активную составляющую удельной электрической энергии, расходуемой на получение единицы готовой продукции.

Представленные в табл. 1 факторы были приняты в качестве способных оказывать влияние на технологический процесс обеззараживания стоков комплексным физико-химическим воздействием в индукторе.

Таблица 1

Table 1

Факторы и уровни их варьирования в натуральных переменных

Factors and levels of their variability in physical variables

Фактор	Кодовое обозначение	Уровни факторов		
		$X_i = -1$	$X_i = 0$	$X_i = +1$
Заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора ρ в %	X_1	0,74	2,96	5,18
Отношение длины рабочих тел к их диаметру *l/d*	X_2	5	15	25
Магнитная индукция *B* в мТл	X_3	40	60	80
Концентрация активного хлора ω в мг/л	X_4	6	12	18
Продолжительность воздействия *t* в с	X_5	2	4	6

В качестве условий исследования рассматривались [2–5]:

– частота колебаний электрического тока в сети *f*, Гц;

– материал рабочих тел.

Кибернетическая модель системы (факторы-условия-объект исследования-параметры показатели качества), иллюстрирующая их взаимосвязь, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема кибернетической модели системы при исследовании влияния параметров технологического процесса обеззараживания стоков на его качество:

ρ — заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора; *l/d* — отношение длины рабочих тел к их диаметру; *B* — магнитная индукция; ω — концентрация активного хлора; *t* — продолжительность совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел; *f* — частота колебаний электрического тока в сети; материал рабочих тел;

$N_{уээ}$ — удельная электрическая энергоёмкость процесса

Fig. 1 Cybernetic system model structure when studying effect of livestock wastes disinfection process parameters on their quality:

ρ – occupancy of inductor operating area by working medium; l/d – working bodies length - their diameter ratio; B –magnetic induction; ω – concentration of active chlorine; t –duration of magnetic field, active chlorine and working medium combined exposure; f – network current oscillation frequency; working medium material; $N_{уээ}$ *– process specific electric energy*

Экспериментальные исследования проводились на индукторе, устройство и принцип действия которого описаны в [2].

Анализ источников [6, 7] и практика решения задач с помощью методов планирования эксперимента показывают, что в большинстве случаев процесс обеззараживания невозможно описать математической моделью первого порядка ввиду ее неадекватности. Значительная кривизна поверхности отклика, как правило, не позволяет описывать её уравнением первого порядка даже в весьма узкой области факторного пространства. В таких случаях необходимо описывать исследуемый процесс с помощью полиномов более высоких порядков, например, второго, имеющего вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k} b_{ij} x_i x_j$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_j — коэффициенты, характеризующие силу влияния свободных, линейных, квадратичных и эффектов взаимодействия членов уравнения.

Существует большое количество планов эксперимента, решающих определённые задачи. При выборе вида плана для конкретного эксперимента необходимо использовать характерный показатель решения задачи, по значению которого оценивается оптимальность найденного решения, то есть, максимальное удовлетворение поставленных требований. Таким показателем является критерий оптимальности плана — мера эффективности плана.

В настоящее время используется свыше 20 различных критериев оптимальности планов [8], которые подразделяются на две основные группы. К первой группе относят критерии, связанные с ошибками оценок коэффициентов, ко второй относятся критерии, связанные с ошибкой оценки поверхности отклика.

Ввиду того, что целью следующего этапа исследования является оптимизация параметров технологического процесса обеззараживания, что требует наиболее точное описания поверхности отклика, предпочтительным являются критерий *G*-оптимальности.

Из всего множества *G*-оптимальных планов или близких к ним по свойствам, с учётом количества рассматриваемых факторов, наиболее предпочтительным является план Хартли Ha_5. Этот план имеет минимальное количество опытов и предпочтительные статистические характеристики, по сравнению с аналогичными планами, поэтому рекомендуется для создания моделей в виде полинома второго порядка [9, 10].

Матрица плана Ha_5 в кодированных переменных представлена в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Матрица плана и результаты эксперимента

Design matrix and experimental results

Номер опыта	Уровни факторов					Удельная электрическая энергоёмкость	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$\bar{y}_{уээ}$	$\hat{y}_{уээ}$
1	-1	-1	-1	-1	+1	7,00	7,02
2	+1	-1	-1	-1	-1	0,20	0,19
3	-1	+1	-1	-1	-1	3,60	3,59
4	+1	+1	-1	-1	+1	1,60	1,59
5	-1	-1	+1	-1	-1	9,60	9,62
6	+1	-1	+1	-1	+1	7,60	7,62
7	-1	+1	+1	-1	+1	11,00	11,02
8	+1	+1	+1	-1	-1	4,20	4,19
9	-1	-1	-1	+1	-1	4,60	4,59
10	+1	-1	-1	+1	+1	2,60	2,59
11	-1	+1	-1	+1	+1	6,00	5,99
12	+1	+1	-1	+1	-1	0,20	0,17
13	-1	-1	+1	+1	+1	12,00	12,02
14	+1	-1	+1	+1	-1	5,20	5,19
15	-1	+1	+1	+1	-1	8,60	8,60
16	+1	+1	+1	+1	+1	6,60	6,59
17	-1	0	0	0	0	9,30	9,25
18	+1	0	0	0	0	4,90	4,96
19	0	-1	0	0	0	4,60	4,55

20	0	+1	0	0	0	3,60	3,66
21	0	0	-1	0	0	3,10	3,16
22	0	0	+1	0	0	8,10	8,05
23	0	0	0	-1	0	5,60	5,55
24	0	0	0	+1	0	5,60	5,66
25	0	0	0	0	-1	4,40	4,46
26	0	0	0	0	+1	6,80	6,75
27	0	0	0	0	0	5,60	5,59

Согласно принятому плану было реализовано 27 опытов. Для уменьшения систематических ошибок опыты проводились в случайном порядке. Каждый опыт дублировался три раза.

Полученные в результате опытов средние значения контролируемых параметров представлены в табл. 2.

Проверка полученных значений оценок дисперсий параллельных опытов на однородность по критерию Кохрена показала, что при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы числителя $f_{K1} = 2$ и знаменателя $f_{K2} = 27$ расчетные значения G_p меньше критического значения $G_к = 0,21$ [11]. Следовательно, гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов справедлива.

После определения оценок коэффициентов, их характеристик и исключения функций из уравнения при статистически незначимых коэффициентах, уравнение регрессии для удельной электрической энергоёмкости принимает вид:

$$y_{уээ} = 5,59 - 2,14x_1 - 0,44x_2 + 2,24x_3 + 1,14x_5 + 1,52x_1^2 - 1,48x_2^2 \quad (1)$$

По полученным уравнениям были рассчитаны значения удельной электрической энергоёмкости $\hat{y}_{уээ}$, представленные в табл. 2.

Проверка полученных уравнений на адекватность по F-критерию показала, что при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и соответствующих степенях свободы $f_{ад}$ и f_e расчетные значения F_p меньше критического значения $F_к$. Следовательно, гипотеза об адекватности уравнений справедлива.

После подстановки переходных коэффициентов и преобразования уравнение регрессии удельной электрической энергоёмкости приняло вид:

$$\hat{N}_{уээ} = 4,815 - 2,789\rho + 0,400\, l/d + 0,112B + 0,570\,t + 0,308\rho^2 - 0,014\, l/d^2 \quad (2)$$

Уравнение (2) даёт возможность рассчитать значения удельной электрической энергоёмкости $N_{уээ}$ для любых точек, находящихся внутри области изучаемого факторного пространства.

На основании экспериментальных данных (табл. 2) были построены графические зависимости, представленные на рис. 2 и 3.

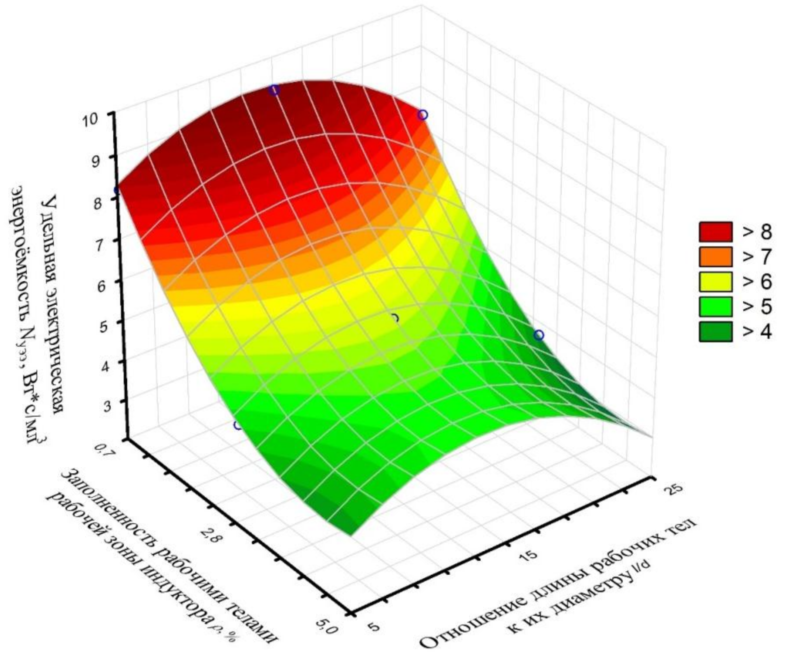


Рис. 2. Зависимость удельной электрической энергоёмкости процесса обеззараживания от факторов, связанных с рабочими телами

Fig. 2. Dependence of specific electric power intensity of disinfection process on factors connected to working medium

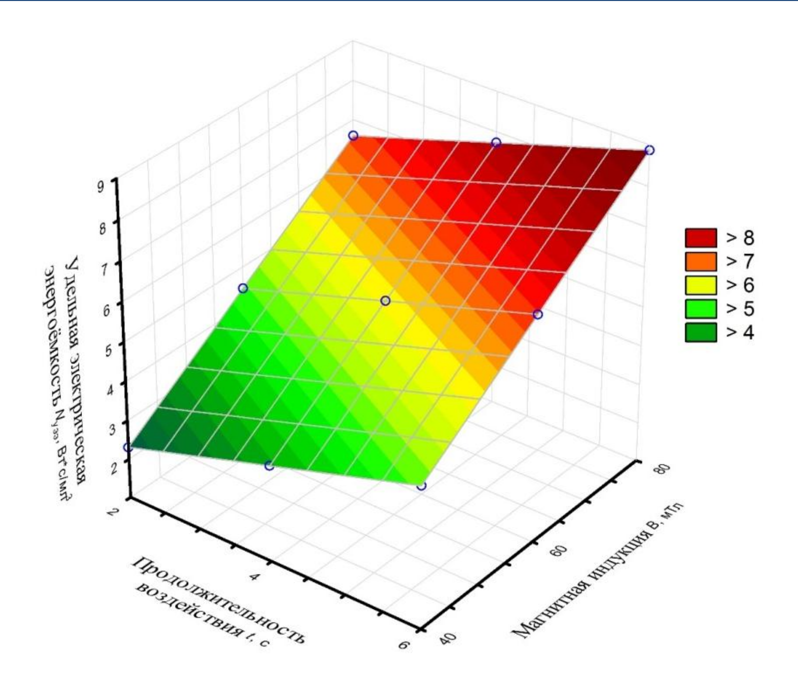


Рис. 3. Зависимость удельной электрической энергоёмкости процесса
обеззараживания от магнитной индукции и продолжительности совместного воздействия магнитного поля и рабочих тел

Fig. 3. Dependence of specific electrical energy intensity of disinfection process on magnetic induction and duration of combined exposure of magnetic fields and working medium

Анализ результатов. Анализ результатов опытов и расчётов (табл. 2), уравнений (1), (2) и графических зависимостей (рис. 2, 3) показал:

– уравнение в кодированных (1) и натуральных (2) переменных в виде полинома второй степени адекватно по критерию Фишера характеризуют зависимость удельной электрической энергоёмкости от рассматриваемых факторов при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$. Поэтому оно может служить в качестве математической модели процесса обеззараживания стоков;

При исследовании влияния рассматриваемых факторов в области интереса на удельную электрическую энергоёмкость установлено:

– статистически не значимыми, в рассматриваемом диапазоне факторов, оказались оценки коэффициентов концентрации активного хлора в пробе, на что указывает отсутствие членов уравнения x_4 (1) или в натуральных переменных ω (2);

– заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора ρ существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов уравнения x_1 (1) или в натуральных переменных ρ (2). При этом, с возрастанием значений заполненности рабочими телами рабочей зоны, происходит убывание значений удельной электрической энергоёмкости по квадратичной зависимости, на что указывает существенная оценка коэффициента x_1^2 (1) или в натуральных переменных ρ^2 (2);

– отношение длины рабочих тел к их диаметру l/d существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов уравнения x_2 (1) или в натуральных переменных l/d (2). При этом, с возрастанием значений отношения длины рабочих тел к их диаметру l/d, происходит убывание значений удельной электрической энергоёмкости по квадратичной зависимости, на что указывает существенная оценка коэффициента x_1^2 (1) или в натуральных переменных ρ^2 (2);

– магнитная индукция B существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов уравнения x_3 (1) или в натуральных переменных B (2). При этом, с возрастанием значений магнитной индукции B, происходит возрастание значений удельной электрической энергоёмкости по линейной зависимости, на что указывает несущественная оценка коэффициента x_3^2 (1) или в натуральных переменных B^2 (2);

– концентрация активного хлора в пробе ω не существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывает отсутствие членов уравнения x_4 (1) или в натуральных переменных ω (2);

– продолжительность совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел на пробу t существенно влияет на удельную электрическую энергоёмкость, на что указывают оценки коэффициентов членов

уравнения x_5 (1) или в натуральных переменных t (2). При этом, с возрастанием значений продолжительности совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел на пробу t, происходит возрастание значений удельной электрической энергоёмкости по линейной зависимости, на что указывает несущественная оценка коэффициента x_5^2 (1) или в натуральных переменных t^2 (2);

– несущественными оказались все оценки коэффициентов парного взаимодействия, что указывает на отсутствие эффекта парного взаимодействия рассмотренных факторов;

– сила влияния факторов распределилась следующим образом: магнитная индукция; заполненность рабочими телами рабочей зоны индуктора; продолжительность совместного воздействия магнитного поля, активного хлора и рабочих тел на пробу; отношение длины рабочих тел к их диаметру.

Заключение. Анализ результатов опытов (табл. 2), расчётов (табл. 2), уравнений (1), (2) и графических зависимостей (рис. 2, 3) позволили оценить влияние ряда технологических факторов на удельную электрическую энергоёмкость процесса, а также наметить гипотезы, объясняющие физическую сущность процессов, происходящих при обеззараживании стоков животноводства путём комплексного физико-химического воздействия магнитного поля и активного хлора.

Библиографический список

1. Лимаренко, Н. В. Анализ способов обеззараживания / Н. В. Лимаренко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения.: сб. тр. 8-й межд. науч.- практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 605–608.

2. Логвиненко, Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем /Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков. — Техника : Киев, 1976. — 144 с.

3. Вершинин, И. Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / И. Н. Вершинин, Н.П. Вершинин — Сальск, 2007. — 368 с.

4. Вершинин, Н. П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и в сельском хозяйстве. Экология. / Н. П. Вершинин. — Ростов-на-Дону, 2004. — 314 с.

5. Лимаренко, Н. В. Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / Н. В. Лимаренко [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 1. — С. 136–142.

6. Драйнер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Драйнер, Г. Смит. — Москва : Статистика, 1973. — 392 с.

7. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. — Москва : Наука, 1980. — 228 с.

8. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. — Москва : Наука, 1976. — 390 с.

9. Karl Siebertz. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) / Karl Siebertz, David van Bebber, Thomas Hochkirchen. – London. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. – 326 p.

10. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1976. — 280 с.

11. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 5-е изд., стер. — Москва : КНОРУС, 2013. — 448 с.

References

1. Limarenko, N.V. Analiz sposobov obezzarazhivaniya. [Analysis of disinfection methods.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo ma-shinostroeniya.: sb. tr. 8-y mezhd. nauch.- prakt. konf. [State and prospects for the development of agricultural machine building: Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 605–608 (in Russian).

2. Logvinenko, D.D., Shelyakov, O.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem. [Process intensification in vortex-layer apparatus.] Kiev: Tekhnika, 1976, 144 p. (in Russian).

3. Vershinin, I.N., Vershinin, N.P. Apparaty s vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem. [Apparatus with rotating electromagnetic field.] Salsk, 2007, 368 p. (in Russian).

4. Vershinin, N.P. Ustanovki aktivatsii protsessov. Ispol'zovanie v promyshlennosti i v sel'skom khozyaystve. Ekologiya. [Process activation units. Application in industry and agriculture. Ecology.] Rostov-on-Don, 2004, 314 p. (in Russian).

5. Limarenko, N.V., et al. Issledovanie parametrov magnitnogo polya v rabochey kamere induktora. [Study on magnetic field parameters in the inductor working chamber.] Vestnik of DSTU, 2016, no. 1, pp. 136–142 (in Russian).

6. Dreyner, N., Smit, G. Prikladnoy regressionnyy analiz. [Applied regression analysis.] Moscow: Statistika, 1973, 392 p. (in Russian).

7. Yevdokimov, Y.A., Kolesnikov, V.I., Teterin, A.I. Planirovanie i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa. [Experimental design and analysis of experiments in solving problems of friction and wear.] Moscow: Nauka, 1980, 228 p. (in Russian).

8. Zedginidze, I.G. Planirovanie eksperimenta dlya issledovaniya mnogokomponentnykh system. [Experimental design to study multicomponent systems.] Moscow: Nauka, 1976, 390 p. (in Russian).

9. Karl Siebertz, David van Bebber, Thomas Hochkirchen. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) London. New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010, 326 p.

10. Adler, Y.P., Markova, E.V., Granovskiy, Y.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy. [Experimental design under searching for optimal conditions.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Nauka, 1976, 280 p. (in Russian).

11. Ventsel, E.S., Ovcharov, L.A. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya. [Theory of random processes and its engineering applications.] 5th reimpression. Moscow: KNORUS, 2013, 448 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.06.2017
Сдана в редакцию 14.06.2017
Запланирована в номер 15.09.2017

Received 14.06.2017
Submitted 14.06.2017
Scheduled in the 15.09.2017

Месхи Бесарион Чохоевич,
заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды», (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ректор Донского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9347-3410
reception@donstu.ru

Meskhi, Besarion C.,
head of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Rector, Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9347-3410
reception@donstu.ru

Лимаренко Николай Владимирович,
аспирант, ассистент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3075-2572
nikolajj-limarenko@rambler.ru

Limarenko, Nikolay V.,
postgraduate student, teaching assistant of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3075-2572
nikolajj-limarenko@rambler.ru

Жаров Виктор Павлович,
профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5645-447X
zharovvp@mail.ru

Zharov, Victor P.,
professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5645-447X
zharovvp@mail.ru

Шаповал Борис Григорьевич,
доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5117-2262
nba-shapoval@yandex.ru

Shapoval, Boris G.,
associate professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand. Sci. (Eng.),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5117-2262
nba-shapoval@yandex.ru